

# 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究： Ⅱ 中尺度对流系统对大尺度场的作用<sup>\* 1</sup>

柳艳菊

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029; 国家气候中心, 北京, 100081; 中国科学院研究生院, 北京, 100039)

丁一汇

(国家气候中心, 北京, 100081)

## 摘 要

通过对 1998 年南海季风爆发过程中大尺度风场、温度场、厚度场、地面气压场以及视热源与视水汽汇的演变分析研究了对流活动对大尺度场的作用, 结果表明: 大尺度环流与中尺度对流活动之间可能存在着一种正反馈机制。在季风爆发早期, 大尺度背景与中尺度对流活动的关系主要表现为前者为季风爆发以及中尺度对流活动的发生提供有利的天气和动力条件; 季风爆发后期持续的大范围中尺度对流活动反过来会对大尺度环流存在明显的反馈作用。由对流活动强烈发展产生的凝结潜热释放在南海北部造成了显著的大气加热, 使对流层中上层出现一明显的加热中心, 这导致: (1) 南海上空经向温度梯度由高层向低层发生反向, 形成北高南低的温度梯度, 从而使大尺度环流发生季节性改变; (2) 相应南海北部地面气压不断加深, 形成宽广的季风槽和明显的减压区, 促使副热带高压从南海地区最后撤离; (3) 随着中低层低压环流的不断发展, 对流系统和降水区进一步加强并向南扩展, 有利于南海季风在南海中、南部地区爆发和维持; (4) 季风槽的加深使其南侧的季风气流与水汽输送进一步加强, 促使季风爆发过程达到盛期。

**关键词:** 中尺度对流, 视热源, 视水汽汇, 反馈。

## 1 引 言

强对流天气是在有利的大尺度环流条件下发生、发展的, 这是大尺度天气系统对强对流的制约作用。而对流一旦生成, 通过对动量、热量和水汽的垂直输送, 又会对其存在的更大尺度的环境条件产生反馈作用, 影响或改变原有风场、湿度场、温度场和大气层结等, 形成新的大尺度气象场<sup>[1]</sup>。季风的爆发和活跃总是伴随着强对流天气, 并造成该地强降水的发生<sup>[2,3]</sup>。Hoskins 等<sup>[4-6]</sup>的研究表明, 在季风持续期间, 较长时间潜热释放产生的大气热源可以对大气环流的异常产生很大影响。亚洲季风最早在南海和中南半岛爆发, 因此对南海夏季风的潜热释放与大气热源的分布能产生重要的影响。研究表

明, 在夏季风期间华南及南海北部的对流活动有助于亚洲季风系统的总降水量和非绝热加热的加强<sup>[7,8]</sup>。谢立安<sup>[9]</sup>、陈天红和罗会邦等<sup>[10]</sup>的研究表明, 水汽凝结潜热释放对南海季风的维持起着重要的作用。这是因为在季风爆发期, 季风区域中风场的动能会急剧增加, 而动能是通过有效位能转换而来的, 根据能量方程, 这就要求有非绝热加热, 尤其是潜热加热来制造有效位能。Johnson 等<sup>[11]</sup>就 1998 年南海北部季风爆发的特征以及对流活动引起的非绝热加热进行了分析, 结果表明南海北部 5 月中旬季风爆发伴随着 7~10 d 的强对流活动, 它们造成了显著的热量和水汽的垂直输送并在南海北部形成强加热场。但是他们的研究并没有讨论中尺度对流活动与加热场、水汽场的关系以及可能的反

\* 初稿时间: 2004 年 10 月 10 日; 修改稿时间: 2005 年 1 月 4 日。

课题资助: 中国科学技术部攀登项目 A“南海季风试验”。

作者简介: 柳艳菊, 女, 1972 生, 山西人, 博士研究生, 主要从事东亚季风研究。

馈作用。在前文<sup>[12]</sup>的基础上,本文主要对季风爆发时期中尺度对流系统(MCSs)对大尺度环境场的作用进行研究,重点分析南海季风区由潜热释放引起的大气加热作用。

## 2 资料与计算方法

文中主要使用由日本气象厅(JMA)制作的1998年GAME/HUBEX一天4次同化分析资料(分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ )以及一天8次的TBB资料(分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ),这个资料集同化了南海季风试验(SCSMEX)外场观测的大部分资料;1998年GPCP(Global Precipitation Climatology Project)逐日降水资料(分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ )。这里采用Yanai等<sup>[13]</sup>的方案计算大气视热源 $Q_1$ 和视水汽汇 $Q_2$

$$\begin{cases} Q_1 = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \left( \frac{p}{p_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \\ \quad = Q_R + L(\bar{c} - \bar{e}) - \frac{\partial}{\partial p} (\overline{S\omega'}) \\ Q_2 = -L \left( \frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right) \\ \quad = L(\bar{c} - \bar{e}) + L \frac{\partial}{\partial p} (\overline{q\omega'}) \end{cases} \quad (1)$$

垂直积分式(1)得

$$\begin{cases} \langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} Q_1 dp = LP + Q_s + \langle Q_R \rangle \\ \langle Q_2 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} Q_2 dp = L(P - E_s) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $T$ 为温度, $\theta$ 为位温, $q$ 为混合比, $\mathbf{v}$ 为水平风速, $\omega$ 为垂直( $p$ )速度, $k=R/c_p$ , $R$ 和 $c_p$ 分别为气体常数和定压比热, $L$ 为潜热, $p_0=1000$  hPa, $\overline{Q_R}$ 是平均辐射加热(或冷却), $\langle Q_R \rangle$ 为其垂直积分,在本文讨论时间段内,它是一个相对小的量,在此略去不计。 $S=c_p T + gz$ 干静力能量, $c$ 为单位质量空气的凝结率, $e$ 为云和雨滴的再蒸发率,符号“ $-$ ”表示水平面上的滑动平均,“ $'$ ”表示对流和乱流等小尺度涡旋引起的对大尺度平均场的距平值, $Q_s$ 为地面感热输送, $P$ 和 $E_s$ 分别为单位面积地面上的降水率和蒸发率。

## 3 过程降水的变化

季风的爆发和活跃总是伴随着强对流天气,并造成该地强降水的发生。这里以5月11~15日代

表季风爆发前,5月16~20日代表季风爆发的第一阶段,5月21~25日代表季风爆发的第二阶段。图1给出了季风爆发前后降水与OLR的差值分布。从图1a,b可以看出,季风爆发的第一阶段,在孟加拉湾北部地区、南海中北部及日本以南的洋面上,是对流活动增强与降水量增加的区域。在季风爆发的第二阶段(图1c,d),对流活动增强及降水量增加的区域均发生了明显的改变,对流活动与降水带增强的区域主要集中在南海中、南部及菲律宾以东的洋面上,而孟加拉湾与南海北部地区对流活动明显减弱,降水量显著减少。降水量及对流活动的这些变化也进一步表明南海季风爆发的两阶段特性。那么,第一阶段季风爆发及对流活动的产生究竟会对第二阶段季风爆发甚至是整个大气环流形势产生怎样的变化呢?

## 4 视热源( $Q_1$ )和视水汽汇( $Q_2$ )的分析

积云对流是在大、中尺度环境条件的制约下发生发展的。一旦有积云对流发生,通过它们对各种物理量的垂直输送又会对更大尺度的环境条件产生反馈作用。然而直接计算这种对流输送是有困难的。因此,采用倒算法通过计算式(2)左边视热源 $Q_1$ 和视水汽汇 $Q_2$ 的垂直积分的水平分布可以定性判断热源的性质,而比较式(1)中的 $(Q_1 - Q_R)$ 和 $Q_2$ 垂直廓线可以判断潜热是由层状云降水还是由对流降水引起的,以此更进一步了解积云对流对大尺度环流的作用<sup>[14]</sup>。

图2首先给出了南海季风爆发前后整层积分的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的差值分布。可以看到,热源和水汽汇的变化在南海季风建立的两阶段是十分明显的。第一阶段季风爆发后,华南、南海北部和日本以南的洋面上是明显的热源与水汽汇增强区,而南海的中、南部主要为热源减少和水汽汇减弱区(图2a,b)。南海季风爆发的第二阶段,热源与水汽汇增强区位置较第一阶段明显偏南(图2c,d)。此外,对比 $Q_1$ 和 $Q_2$ 场的分布,可以发现 $Q_1$ 和 $Q_2$ 无论在位置和强度上都与降水十分接近,热源增强区与对流活跃、降水增强区的位置非常一致,这说明随着西南季风在南海地区的盛行,对流活动加强,降水产生的凝结潜热成为大气的主要热源,它与活跃的对流活动及中尺度对流系统发展有密切关系。此外,文中还分析了季风爆发前后对流层中高层300~500 hPa层的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的差值分布情况(图略)。从图可以看出,它

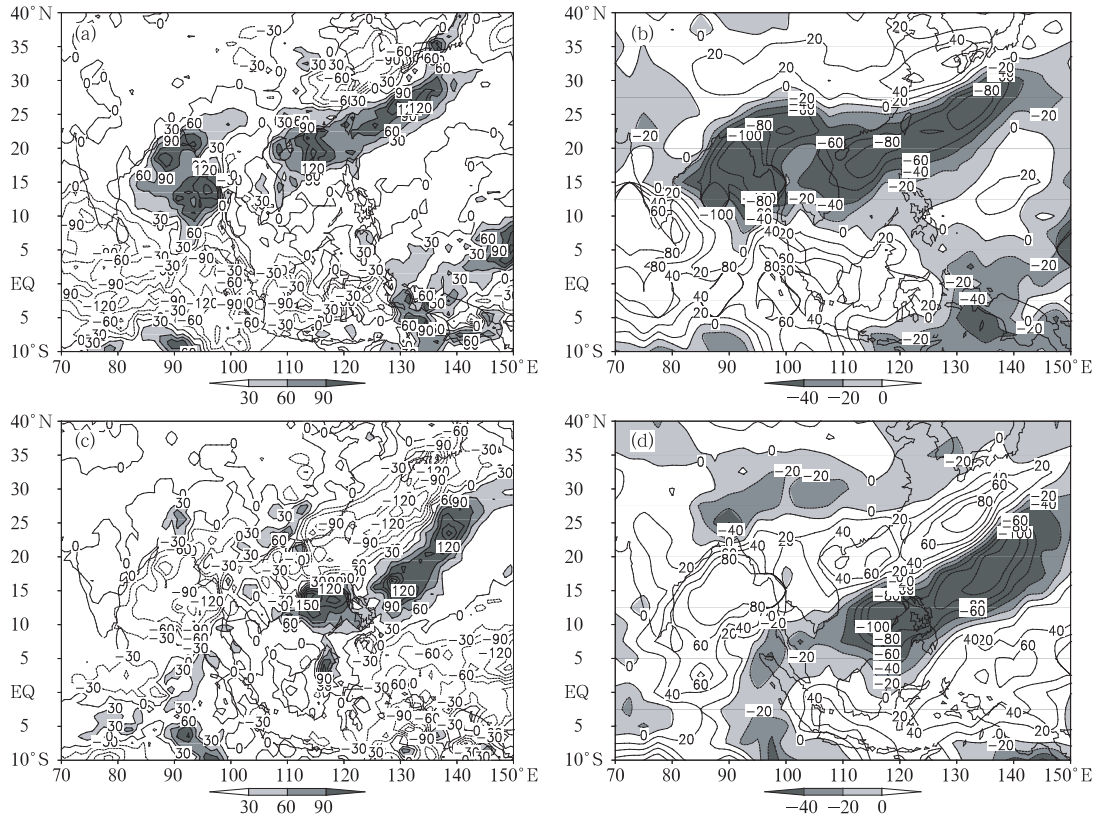


图1 南海季风爆发前后过程总降水量(a,c;单位:mm)和平均的OLR(b,d;单位: $W/m^2$ )的差值分布(a与b. 5月16~20日与5月11~15日之差, c与d. 5月21~25日与5月16~20日之差, a与c. 阴影区大于30 mm, 等值线间隔为30 mm; b与d. 阴影区小于 $0 W/m^2$ , 等值线间隔为 $20 W/m^2$ )

Fig. 1 Difference distribution of precipitation (a,c; unit: mm) and OLR (b,d; unit:  $W/m^2$ ) before and after the South China Sea (SCS) monsoon onset (a and b. Difference between 16–20 May and 11–15 May, c and d. Difference between 21–25 May and 16–20 May; For a and c. the values exceeding 30 mm are shaded, the contour interval is 30 units; For b and d. the values exceeding zero are shaded, the contour interval is 20 units)

们的分布形势与整层积分的分布形势基本相同,只是在量值上略有减小,这说明水汽释放的凝结潜热主要在对流层中高层,很显然这是对流加热的结果。

另外,从南海北部与南部整层垂直积分 $Q_1, Q_2$ 的逐日演变(图3)看,在南海夏季风爆发前, $Q_1, Q_2$ 基本上是负值,说明大气是冷源( $Q_2 < 0$ )。对于南海北部,当季风爆发时,5月15日前后大气加热场迅速在南海北部地区建立,并且加热的量值随着时间的演变显著增加, $Q_1$ 迅速转变为大的正值(加热), $Q_2$ 也出现急增,大约在5月18日出现峰值,并且5月15日后 $Q_1, Q_2$ 的曲线趋势是一致的,从而可以判断此时南海北部大气的加热以潜热为主,大气迅速转变为一个热源。对于南海南部 $Q_1, Q_2$ 转变为正值的时间大约在5月21日,此后 $Q_1, Q_2$ 迅速出现急增,并在5月23日出现峰值,较南海北部峰值大(约 $100 W/m^2$ )。从这一点上可以进一步

说明,南海北部的潜热加热要比南部爆发约早1候。

分析 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的垂直分布,以便进一步判断潜热是由层状云降水还是对流云降水引起的,进而证实积云对流对热量和水汽垂直输送的重要性。如果两剖面的峰值在近于同一高度上,则加热主要由锋面(或连续性)降雨造成,否则,潜热释放与对流活动密切相关,这时两者的峰值不在同一高度。图4给出了季风爆发期间(两阶段)南海北部、南部区域平均的垂直速度( $\omega$ ), $Q_1, Q_2$ 廓线。可以看出在南海季风爆发的第一阶段,南海北部(图4a), $Q_1, Q_2$ 及 $\omega$ 较季风爆发前(图略)明显增强, $\omega$ 整层为负,均为上升运动,最大上升运动在250 hPa附近。此外, $Q_1, Q_2$ 廓线在高层出现了明显的分离,最大加热出现400~500 hPa,而最大增湿在700 hPa附近;而南海南部(图4b)在这一阶段几乎没有什么天气现象发生, $Q_1, Q_2$ 及 $\omega$ 都比较小,趋近于0,这说明

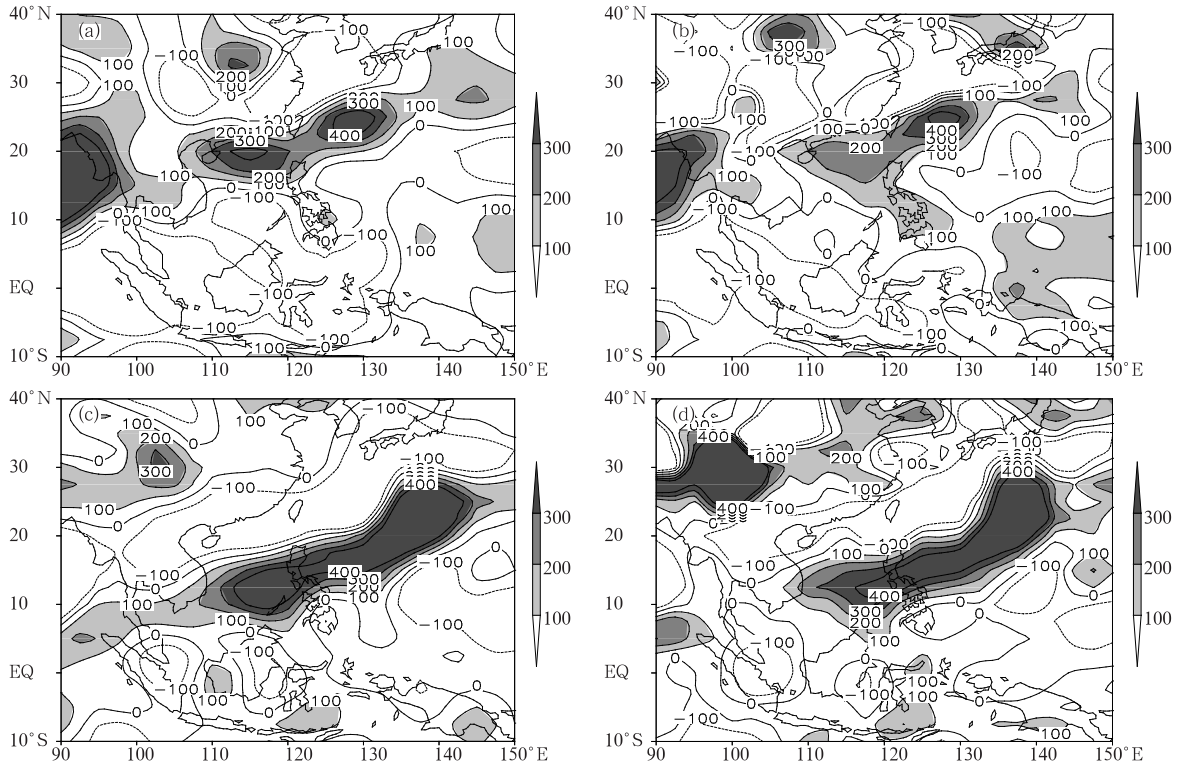


图2 南海季风爆发前后整层垂直积分的  $Q_1$  (a,c) 和  $Q_2$  (b,d) 的差值分布(单位:  $W/m^2$ )

(a,b. 分别为5月16~20日与5月11~15日  $Q_1$  和  $Q_2$  之差,c,d. 分别为5月21~25日与5月16~20日  $Q_1$  和  $Q_2$  之差; 阴影区大于  $100 W/m^2$ , 等值线间隔为  $100 W/m^2$ )

Fig. 2 Difference distribution of vertically integrated  $Q_1$  (a,c) and  $Q_2$  (b,d) before and after the SCS monsoon onset (unit:  $W/m^2$ ) (a and b. Difference between 16–20 May and 11–15 May; c and d. Difference between 21–25 May and 16–20 May; the values exceeding  $100 W/m^2$  are shaded, the contour interval is 100 units)

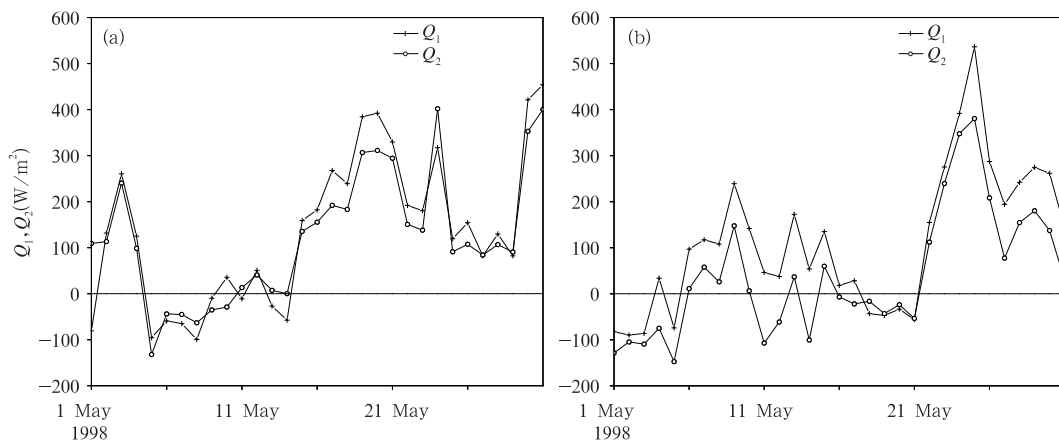


图3 南海区域整层垂直积分  $Q_1, Q_2$  的时间演变曲线

(a. 南海北部 ( $15^{\circ}\sim 22.5^{\circ}N, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}E$ ), b. 南海南部 ( $5^{\circ}\sim 15^{\circ}N, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}E$ ); 单位:  $W/m^2$ )

Fig. 3 Daily variation of vertically integrated  $Q_1, Q_2$

(a. Northern SCS ( $15^{\circ}\sim 22.5^{\circ}N, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}E$ ); b. Southern SCS ( $5^{\circ}\sim 15^{\circ}N, 110^{\circ}\sim 120^{\circ}E$ ); unit:  $W/m^2$ )

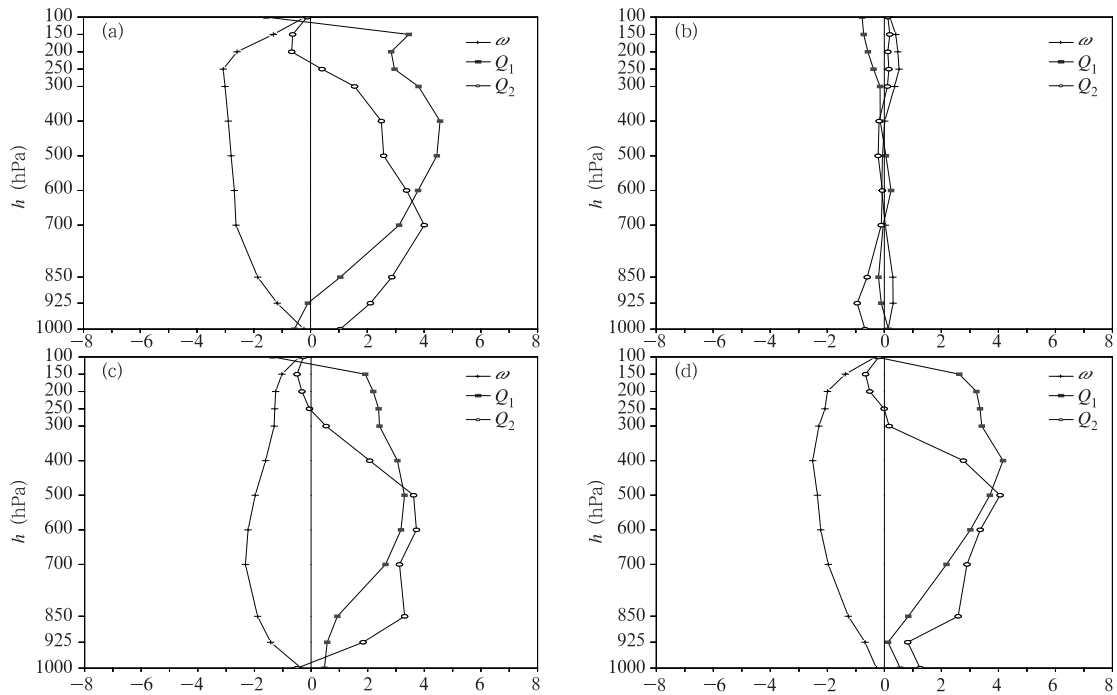


图 4 南海季风爆发第一阶段(a,b)与第二阶段(c,d) $\omega$ (单位:hPa/h),  
 $Q_1, Q_2$ (单位:K/d)的垂直廓线(a与c. 南海北部, b与d. 南海南部)

Fig. 4 Vertical profiles of  $\omega$ (unit: hPa/h),  $Q_1, Q_2$ (unit: K/d) during the first (a,b) and second phase (c,d) of the South China Sea monsoon onset (a and c. Northern SCS, b and d. Southern SCS)

此时南部季风尚未爆发。在季风爆发的第二阶段,南海北部的对流活动较第一阶段略有减弱(图 4c);而对于南海南部(图 4d),垂直上升运动明显加强, $Q_1, Q_2$  较季风爆发第一阶段显著增强, $Q_1$  整层为正, $Q_1, Q_2$  廓线在高层上同样也出现了明显的分离。此外可以发现,当  $Q_1, Q_2$  廓线在高层出现明显的分离时,在对流层中低层, $Q_2$  大于  $Q_1$ ,而对流层中高层,情况则相反,峰值位于 400 hPa 附近,约为 4~5 K/d,这说明主要的加热过程出现在大气高层。 $Q_1, Q_2$  的这种垂直分布表明,季风爆发期间潜热加热与积云对流活动密切相关,在季风爆发的两个阶段,降水都是以对流降水为主,对流活动对热量和水汽的垂直输送很大,从而说明积云对流对大尺度环流起反馈作用。

通过上述分析,可以推断出大尺度环流与中尺度对流系统之间可能存在着一种正反馈机制:即在季风爆发第一阶段,南海北部有较强的深对流发生。在对流活跃的情况下,次网格的涡动垂直输送很强,因而水汽在中低层释放的凝结潜热被活跃的对流活动向上输送,导致对流层高层的强烈加热,从而会改变大尺度流场,使地面气压降低。随着季风槽在南海中部的建立以及冷空气的南侵,南海南部季风大

规模爆发,对流活动与降水发生,并释放大量的凝结潜热,进而在南海的南部重新又建立一种正反馈机制。

## 5 中尺度对流系统对大尺度场的反馈作用

本节逐一分析季风爆发前后大尺度风场、湿度场、温度场和大气层结等变化,以期进一步说明南海季风爆发期间大尺度环流与中尺度对流之间正反馈机制的存在。需要说明的是,虽然不能定量从大尺度场的变化中分离出中尺度对流系统对大尺度场的反馈效应,但是通过大尺度场的总体变化可以定性推断这种反馈效应的存在。

### 5.1 中尺度对流系统对大尺度风场的影响

根据爆发前后 W-Y 季风指数<sup>[15]</sup> ( $U_{850} - U_{200}$  的垂直风切变)分布的差值(图 5a)可以看出,在季风第一阶段爆发后,南海地区是负的东风切变区,主要的西风切变大值区集中在孟加拉湾东部以及菲律宾以东地区。季风第二阶段爆发后(5b),孟加拉湾北部、南海的大部分地区及其以东的洋面上, W-Y 季风指数迅速转变为西风切变,中心强度超过 20 m/s,这说明在季风爆发的第二阶段,对流活动大大加强,中尺度对流系统(MCSs)频繁发生发展,这可能促使南海地区的西南风显著加强。进一步分



析季风爆发前后 850 和 200 hPa 高低空散度场的差值分布(图略)可以发现,季风爆发前后高空辐散增强(降低)与低空的辐合增强区(减弱)是一一对应的。季风爆发第一阶段对流层低层主要的辐合增强区集中在孟加拉湾和南海北部地区,与对流层低层相对比此时 200 hPa 上这些地区主要是辐散增强区。季风爆发第二阶段,南海北部与孟加拉湾地区

对流层低层则变成了辐散增强区,而南海的中部及南部地区及菲律宾以东洋面上则是辐合增强区,对应季风在南海地区全面爆发。高空场的配置则与之相反,这种高低空的动力配置有助于产生较强的大尺度上升运动将热量和水汽向高层输送,垂直速度场的分布与之也是一一对应的(图略)。

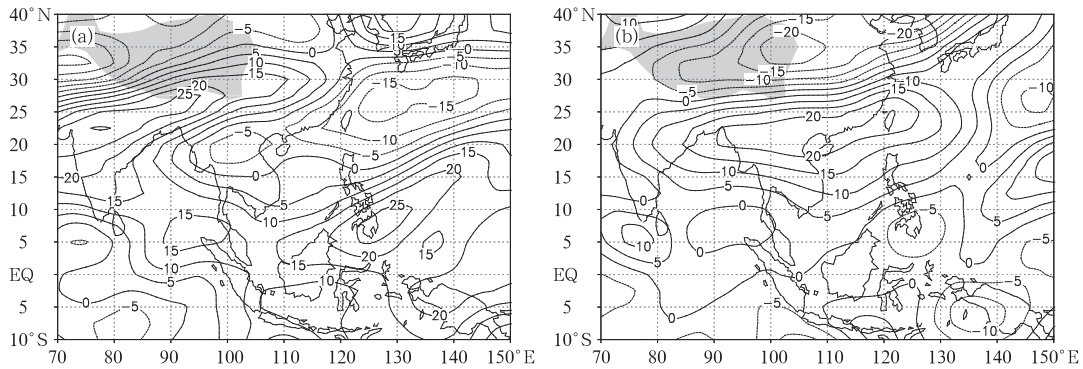


图 5 南海季风爆发前后 W-Y 季风指数( $U_{850} - U_{200}$  垂直风切变)的差值分布

(a. 5月16~20日与5月11~15日之差, b. 5月21~25日与5月16~20日之差;单位: m/s)

Fig. 5 Difference distribution of W-Y monsoon index ( $U_{850} - U_{200}$ ) before and after the SCS monsoon onset

(a. Difference between 16-20 May and 10-15 May, b. Difference between 10-15 May and 16-20 May; unit: m/s)

## 5.2 中尺度对流系统对大尺度热力场的影响

亚洲季风区从冬到夏季节转变的一个重要特征是对流层经向温度梯度的反转,即温度梯度从冬季时由南向北转为夏季的由北向南。Li 等<sup>[16]</sup>,何金海等<sup>[17]</sup>研究认为,南海夏季风爆发的基本成因是南海所在经度上经向温度梯度的逆转向所致。图 6 给出了南海地区区域平均的温度经向变化( $\partial T/\partial y$ )的高度-时间剖面,正值表明温度分布是北高南低,负值则为南高北低。5月21日前后温度梯度的分布发生了突变,温度经向变化( $\partial T/\partial y$ )正值区自对流层高层 200 hPa 开始向下延伸发展,一直到 700 hPa 附近,说明 21 日后南海区域大范围的温度场发生了显著变化,这一结果与季风在南海地区大规模的爆发时间是一致的。根据上面的分析可知,温度梯度的开始转向大约滞后南海第一阶段季风爆发 1 候左右的时间。这意味着季风爆发第一阶段降水释放的凝结潜热首先加热了大气并且产生的对流活动把热量和水汽向上垂直输送使大气热源的分布、温度梯度相应发生改变,从而影响大范围的大尺度环流。随着南海地区经向温度梯度的转向,大尺度流场发生季节性的改变,从而导致南海季风全面爆发以及季风区向东和向西的传播。因而 1998 年南海季风第

一阶段的爆发不只具有区域和局地的意义,它实际上是亚洲夏季风开始大尺度爆发的标志。

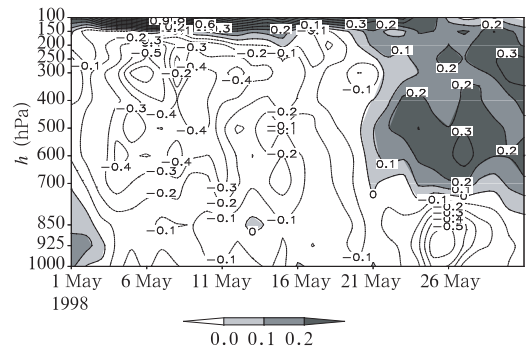


图 6 南海区域( $5^{\circ} \sim 22.5^{\circ} \text{N}, 110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ )

夏季风爆发期间的温度经向变化( $\partial T/\partial y$ )

的高度-时间剖面(单位:  $^{\circ}\text{C}/(2.5 \text{ 纬度})$ )

Fig. 6 The height-time cross section of meridional

temperature variation ( $\partial T/\partial y$ ) over the

SCS ( $5^{\circ} - 22.5^{\circ} \text{N}, 110^{\circ} - 120^{\circ} \text{E}$ ) during the SCS

monsoon onset (unit:  $^{\circ}\text{C}/(2.5 \text{ latitude})$ )

对比季风爆发前后 300 和 500 hPa 之间厚度的差值分布(图 7a)可以看出,季风爆发第一阶段较季风爆发前,在印度半岛北部和菲律宾以东的洋面上,厚度明显增强,说明这些地区是温度发生改变的最

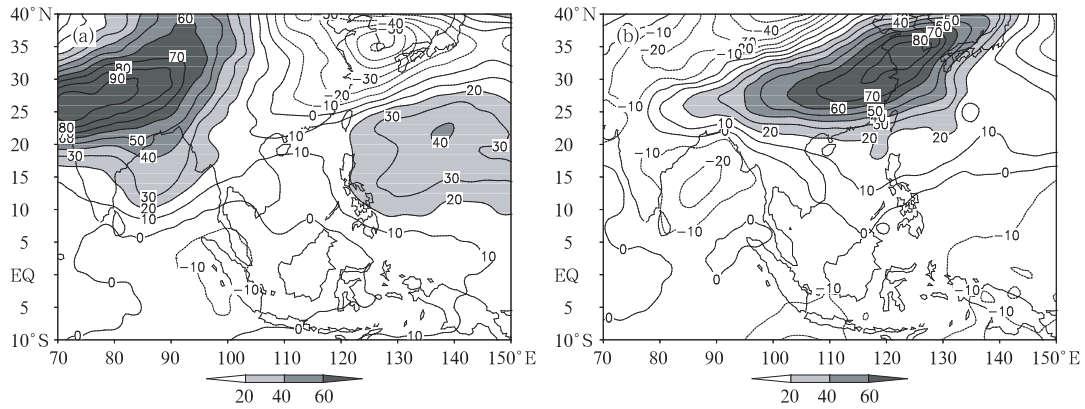


图 7 南海季风爆发前后的厚度( $Z_{300-500}$ )差值分布

(a. 5月16~20日与5月11~15日之差, b. 5月21~25日与5月16~20日之差; 单位: gpm)

Fig. 7 Difference distribution of the thickness between 300 and 500 hPa before and

after the SCS monsoon onset (a. Difference between 16-20 May and

11-15 May, b. Difference between 21-25 May and 16-20 May; unit: gpm)

早地区。在南海地区厚度的差值也为正但不明显。季风爆发的第二阶段较第一阶段, 南海、华南地区厚度变化发生了非常明显的变化, 变化的幅度较第一阶段与季风爆发前之差更为剧烈(图 7b), 说明南海与华南地区在季风爆发的第二阶段, 对流层高层温度增温在亚洲季风区是显著的, 这同时也说明对流活动把热量不断向高层输送。相反在对流层低层 925 hPa 季风爆发前后气温差值分布上(图略), 可以发现在季风爆发的第一阶段孟加拉湾及南海北部是明显的降温地区, 说明由于西南风在南海北部首先爆发导致降水发生后, 潜热不断向上输送, 使近地面气温明显降低。季风爆发第二阶段, 在华南与南海北部、中部及朝鲜半岛以南地区, 仍是大面积降温区。上述分析说明, 随着季风在南海地区的全面爆发的爆

发, 对流层高层迅速变暖, 而在低层边界层则变冷, 这种现象是对流活动对热量垂直输送的结果<sup>[7,8]</sup>。

### 5.3 中尺度对流系统对水汽场的影响

从季风爆发前后整层积分的水汽通量散度的差值分布(图 8)可以看出, 水汽通量的辐合增强区与对流活动及降水量的增强区是对应的。在季风爆发第一阶段, 辐合的增强区主要集中在南海北部及孟加拉湾地区(图 8a)。在季风爆发的第二阶段, 辐合增强区主要集中在南海中、南部及其以东的洋面上, 而南海的北部及孟加拉湾地区则为水汽辐合减弱区(图 8b)。从南海地区 300 与 925 hPa 季风爆发期间的曲线分布(图略)可以看出, 在季风爆发的第一阶段, 对流层低层 925 hPa 主要表现为大气比湿减弱, 而高层 300 hPa 却表现为大气比湿增加, 这表明

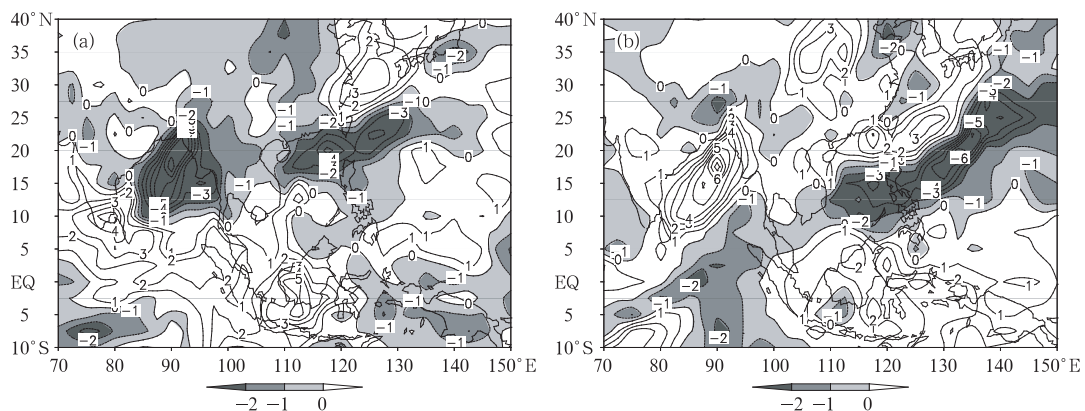


图 8 南海季风爆发前后的水汽通量散度的差值分布

(a. 5月16日与5月11~15日之差, b. 5月21~25日与5月16~20日之差; 单位:  $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

Fig. 8 Difference distribution of the moisture flux divergence before and after the SCS

monsoon onset (a. Difference between 16-20 May and 11-15 May; b. Difference

between 21-25 May and 16-20 May; unit:  $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

季风第一阶段爆发后,对流层低层的水汽通过对流的垂直输送被输送到对流层高层,从而造成“高-湿、低-干”的分布。季风爆发第二阶段后,在对流活动与降水明显的南海中、南部低层仍是相对干区,结合上一节的对流对温度的垂直输送,可以得到,季风爆发后强烈发展的对流活动,通过对热量与水汽的垂直输送,在高层产生增温增湿,在低层(主要是边界层中)由于热量与水汽向上输送的结果,造成干、冷化趋势。

#### 5.4 中尺度对流系统对大气层结的影响

图9给出了季风爆发前后300及925 hPa假相当位温的差值分布。从图9a中可以看出在季风爆发的第一阶段,对流层高层大气增温、增湿的地区主要分布在南海中、北部地区,其分布形势与300~

500 hPa厚度场的分布基本上是一致的。这说明季风第一阶段爆发后,在对流层高层,由于热量和水汽不断被输送到对流层高层,因而使大气变得更加高温、高湿。在季风爆发的第二阶段(图9b),在南海中、南部对流层高层增温、增湿已经很明显,这主要由于季风爆发后大量的暖湿空气在这个地区被向上输送。虽然在此所得的925 hPa假相当位温分布图上(图9d)在南海中、南部并没有出现假相当位温的负值变化区而是明显的正值区,但是增温、增湿不是很强。一个可能的解释是虽然由于凝结潜热释放,热量和水汽不断被输送到对流层高层,从而会使地面变冷、变干。但由于季风爆发期间海面温度偏高,从而使热量和水汽不断向近地层大气输送,从而会

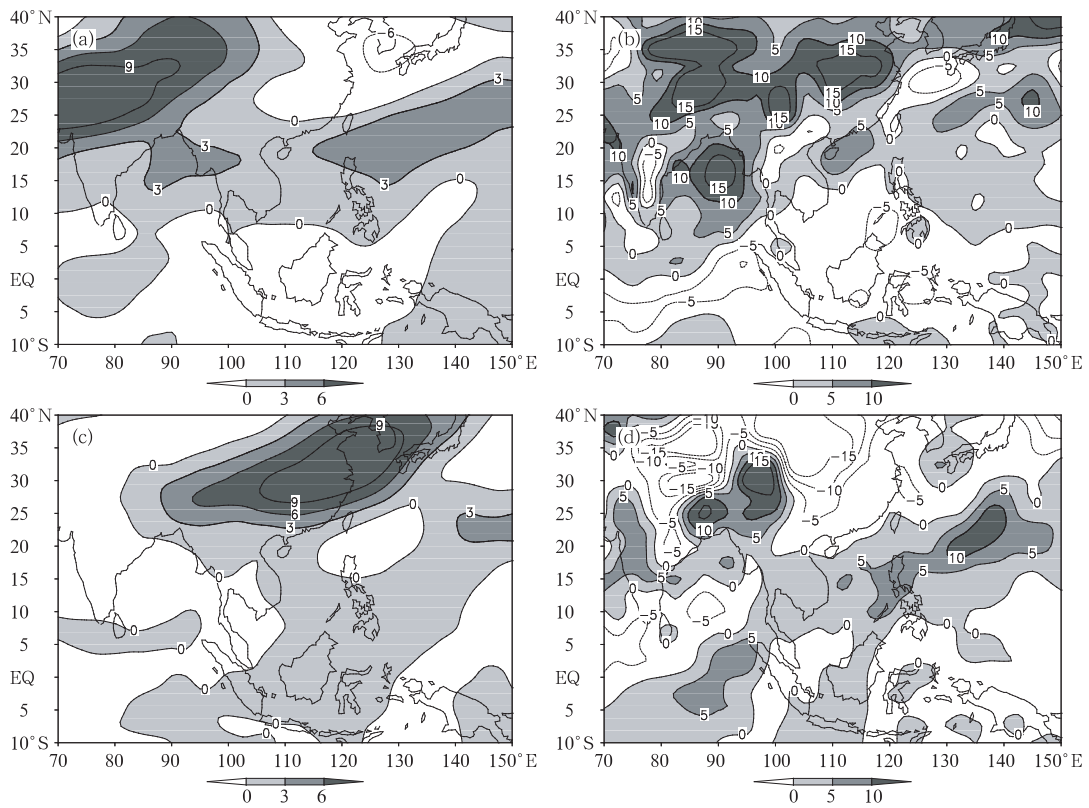


图9 南海季风爆发前后300 hPa(a,c)和925 hPa(b,d)假相当位温差值分布(a与b为5月16~20日与5月11~15日假相当位温之差,c与d为5月21~25日与5月16~20日之差;单位:K)

Fig. 9 Difference distribution of the pseudo-equivalent temperature at 300 hPa(a,c) and 925 hPa(b,d) before and after the SCS monsoon onset (a and b. Difference between 16–20 May and 11–15 May; c and d. Difference between 21–25 May and 16–20 May; unit: K)

削弱地面干冷化的强度。

#### 5.5 中尺度对流系统对地面气压场的影响

前面已经指出,在季风爆发的第一阶段中尺度对流活动造成的大气加热场的加强会通过CISK机制导致地面辐合加强,从而使地面气压场加深。在

季风爆发第一阶段与季风爆发前的差值图上(图10a),可以看到地面气压场的这种加强过程。季风在第一阶段爆发后,南海大部分地区仍然维持正压的变化,地面气压减小的趋势不是很明显。但在季风爆发的第二阶段,地面气压发生剧烈变化,南海



地区处在明显负变压区,地面气压不断加深(图 10b)。分析 5 月 21~25 日地面风场与 TBB 逐日的合成图(图 11),可以看到 5 月 21 日 00:00Z(图 11a),在南海中部、台湾岛—巴士海峡附近相应于低压中心已形成一明显的中尺度气旋环流。此后该低压环流不断加深并向东偏北移动,期间南海中部始终有强对流区维持(图 11b)。5 月 24~25 日,南海中部对流明显增强,同时南部开始有云系出现,南海北部有低压生成(图 11c),与南海季风全面爆发后的形势是一致的。这表明随着对流活动加强,上升运动增强,强降水发生,对流层中高层大量的凝结潜热被释放,有利于高空气流的辐散增强,这进一步促使低层湿空气辐合与对流活动加强,从而形成一种

正反馈机制,使得南海地区地面气压不断加深,形成一宽广的低压槽区。在台湾岛—巴士海峡附近出现的明显中尺度气旋环流和低压中心可能就是这种正反馈的产物,关于这一点需要利用数值模式进一步证明<sup>[18]</sup>。

通过上述分析,可以说明大尺度环流与中尺度对流之间存在着一种正反馈机制。在季风爆发第一阶段,南海北部有较强的深对流发生。在对流活跃的情况下,次网格的涡动垂直输送强,因而水汽在中低层释放的凝结潜热被活跃的对流活动向上输送,导致对流层高层的强烈加热,从而使对流层上层维持暖心结构,而这种配置非常有利于高空反气旋环流的发展和气流辐散的加强,进而又促进了季风槽

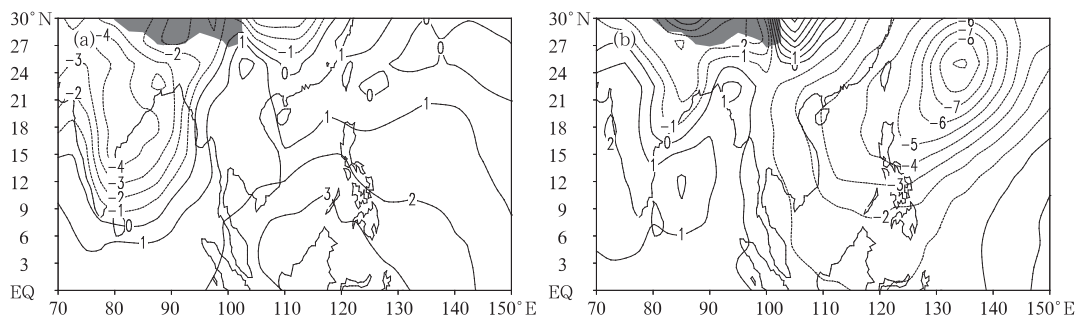


图 10 南海季风爆发前后地面气压差值分布

(a. 5 月 16~20 日与 5 月 11~15 日之差; b. 5 月 21~25 日与 5 月 16~20 日之差;单位: hPa)

Fig. 10 Difference distribution of the surface level pressure before and after the SCS monsoon onset

(a. Difference between 16-20 May and 11-15 May, b. Difference between 21-25 May and 16-20 May; unit: hPa)

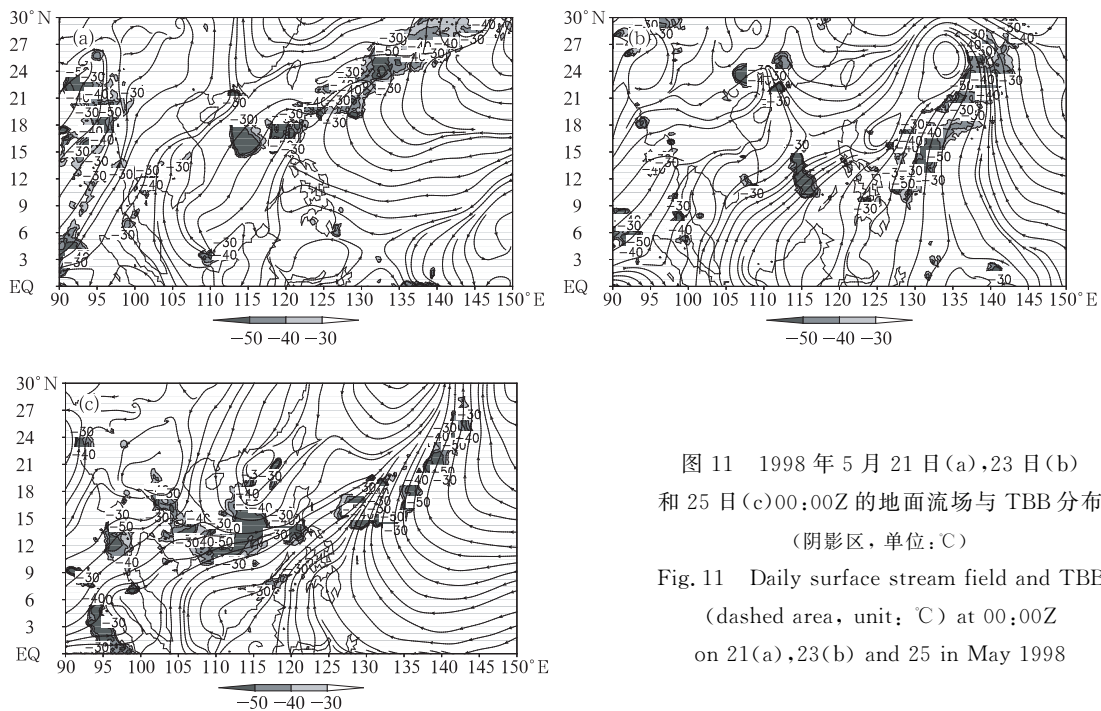


图 11 1998 年 5 月 21 日(a), 23 日(b)和 25 日(c)00:00Z 的地面流场与 TBB 分布(阴影区, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 11 Daily surface stream field and TBB (dashed area, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 00:00Z on 21(a), 23(b) and 25 in May 1998

加深与低空气流的辐合,形成对流以后更激烈发展的环境条件,因而形成了一种正反馈机制,南海季风

的爆发及大尺度流场的改变正是这种正反馈的产物(图 12)。

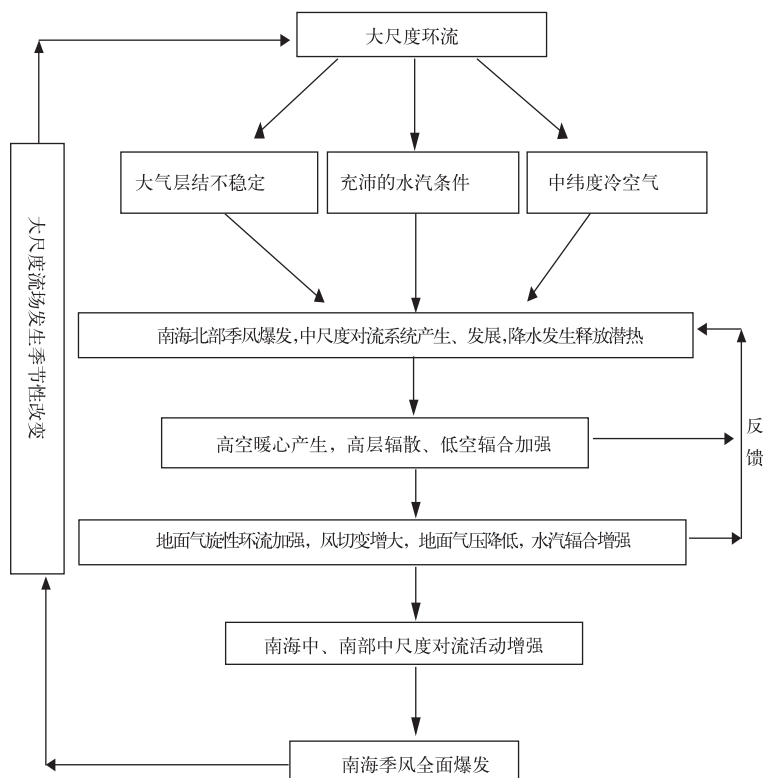


图 12 大尺度环流与中尺度对流之间的正反馈示意

Fig. 12 Positive feedback schematic map between large-scale circulation and meso-scale convective systems (MCSs)

## 6 结 论

通过对 1998 年南海夏季风爆发前后视热源与视水汽汇、大尺度风场、温度场、厚度场以及地面气压场变化的诊断分析,结果表明 1998 年南海季风爆发期间大尺度环流与中尺度对流之间存在着一种正反馈机制。季风爆发前,大尺度背景提供季风爆发与中尺度对流活动的有利的天气和动力条件;季风爆发后持续的大范围中尺度对流活动的产生反过来会对大尺度环流存在明显的作用。南海北部季风爆发后,对流活动十分活跃。在这种情况下,次网格的涡垂直输送很强,因而水汽在中低层释放的凝结潜热被活跃的对流活动向上输送,导致对流层中高层的强烈加热,从而使对流层上层维持暖心结构,而这种配置非常有利于高空反气旋环流的发展和气流辐散的加强,从而促进了季风槽加深与低空气流辐合加强,这使季风爆发不断增强,并且不断扩大,造成南海季风第二阶段的大规模爆发。在这个过程

中,正反馈机制可能起了非常重要的作用,这个事实也表明南海季风的爆发过程是一种多尺度相互作用的结果。

## 参考文献

- [1] 丁一汇. 高等天气学. 北京:气象出版社,1991. 792pp  
Ding Yihui. Advanced Synoptic Meteorology. Beijing, China Meteorological Press, 1991. 792pp
- [2] 阎俊岳. 南海西南季风爆发的气候特征. 气象学报, 1997, 55(2): 174~186  
Yan Junyue. Climatological characteristics on the onset of the South China Sea southwest monsoon. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1997, 55(2): 174-186
- [3] 丁一汇, 李崇银, 何金海等. 南海季风试验与东亚夏季风. 气象学报, 2004, 62(5): 561~586  
Ding Yihui, Li Chongyin, He Jinhai. South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) and the East-Asian monsoon. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2004, 62(5): 561-586
- [4] Hoskins B, Rodwell M. A model of the Asian summer mon-

- soon, Part I: the global scale. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 1329—1340
- [5] Hoskins B, Rodwell M. A model of the Asian summer monsoon, Part II: the cross-equatorial flow and PV behavior. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 1341—1356
- [6] Hoskins B. Monsoons and the dynamics of deserts. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122: 1385—1404
- [7] Luo H B, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan and surrounding areas during the early summer of 1979, Part II: heat and moisture budgets. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 966—989
- [8] Yanai M, Tomita T. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks determined from NCEP-NCAR reanalysis. *J Climate*, 1998, 11: 463—482
- [9] 谢立安. 季南海季风活动的诊断分析. *南京气象学院学报*, 1986, 2: 120—134  
Xie Lian. Diagnosis of the South China Sea monsoon activities. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 1996, 2: 120—134
- [10] 陈天红, 罗会邦. 夏季风建立期间南海大气潜热作用的分析. *南海海洋科学集刊*, 1989, 9: 95—106  
Chen Tianhong, Luo Huibang. Analysis of atmospheric latent heating during the summer monsoon establishment. *Collection of Oceanography Science over the South China Sea (in Chinese)*, 1989, 9: 95—106
- [11] Johnson R H, Ciesielski P E. Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the northern South China Sea. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 80: 561—578
- [12] 柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件分析. *气象学报*, 2005, 63(4):  
Liu Yanju, Ding Yihui, Zhao Nan. A study on the meso-scale convective systems during the summer monsoon onset over the South China Sea in 1998: I analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2005, 63(4):
- [13] Yanai M, Esbensen S, Chu J H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and source budgets. *J Atmos Sci*, 1973, 30: 611—627
- [14] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp  
Chen Longxun, Zhu Qianguan, Luo Huibang, et al. *The East Asian Monsoon*. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp
- [15] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1992, 118: 877—926
- [16] Li C F, Yanai M. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast. *J Climate*, 1996, 9: 358—375
- [17] 何金海, 罗京佳. 南海季风爆发和亚洲夏季风推进特征及其形成机制的探讨. 见: 何金海主编. 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1996, 74—81  
He Jinhai, Luo Jingjia. Features of the South China Sea monsoon onset and Asian summer monsoon establishment sequences along with its individual mechanism. In: He Jinhai eds. *The Recent Advances in Asian Monsoon Research*. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 74—81
- [18] Lin S C, Kueh M T. A modeling diagnosis of the development of mesoscale convective system over South China Sea during the summer monsoon onset in 1998. *TAO*, 2003, 14: 369—399

**A STUDY ON THE MESO-SCALE CONVECTIVE SYSTEMS DURING  
SUMMER MONSOON ONSET OVER THE SOUTH CHINA SEA IN 1998:  
II EFFECT OF THE MESO-SCALE CONVECTIVE  
SYSTEMS ON LARGE-SCALE FIELDS**

Liu Yanju

*(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;*

*National Climate Center, Beijing 100081;*

*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)*

Ding Yihui

*(National Climate Center, Beijing 100081)*

**Abstract**

The apparent heat sources, apparent moisture sinks and large-scale wind, temperature as well as surface pressure during the summer monsoon onset over the northern South China Sea (SCS) in 1998 were investigated. The results suggested that there was a kind of positive feedback mechanism between large-scale circulations and meso-scale convective systems (MCSs). At the early stage of the monsoon onset, the large-scale background provided favorable synoptic and dynamic conditions for the summer monsoon onset and formation of meso-scale convective activities; whereas after the summer monsoon onset, occurrence of persistent and large-scale meso-scale convective activities produced obvious feedback effect on large-scale circulations. Because of the release of latent heating driven by enhanced convective activities, the intense atmospheric heating appeared over the northern SCS, which resulted in: (1) the meridional temperature gradient over the SCS reversed from upper-level to low-level and then the large-scale circulations were changed seasonally; (2) correspondingly, the surface pressure over the northern SCS deepened continually and formed broad monsoon trough and obvious pressure-reducing areas, thus making the subtropical high moving out of the SCS eventually; (3) with the development of the low pressure circulations in the middle and low troposphere, the MCSs further enhanced and extended southward, which was favorable to the SCS monsoon onset and maintaining over the middle and southern SCS; (4) the deepening of monsoon trough promoted strengthening of the monsoon flow and moisture transport on the southern side of it, consequently the monsoon onset reaching prevalence.

**Key words:** Meso-scale convection, Apparent heat sources, Apparent moisture sinks, Feedback.